

# Classificação de culturas irrigadas na região de Bebedouro, PE, Brasil, usando a informação polarimétrica das imagens da missão SIR-C/X-SAR

Sueli Pissarra Castellari Ribeiro  
Luciano Vieira Dutra  
Camilo Daleles Rennó  
João Vianei Soares

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
DPI - Divisão de Processamento de Imagens  
Av. dos Astronautas, 1758  
12227-010 São José dos Campos, SP, Brasil  
sueli,dutra@dpi.inpe.br  
camilo,vianei@ltd.inpe.br

## ABSTRACT

This paper investigates the use of polarimetric information extracted from SIR-C/X-SAR complex polarimetric images for crop discrimination in Bebedouro region, Pernambuco state, Brasil. In addition to widely used modulus of complex channels (amplitude) another two channels, modulus and phase from complex correlation coefficient between HH and VV complex channels were also used. The phase of correlation coefficient is a smoothed version of phase difference information between HH and VV, and was used in lieu of it. Five classes; corn, soya beans, stubble, bare soil and "caatinga" were defined. To assess the discrimination power of the extracted features confusion matrix of maximum likelihood per point classification and Jeffreys-Matusita distance were calculated for these classes. Results showed that phase information can greatly improve the classification accuracy and the modulus of correlation coefficient carries also discrimination power.

## 1. Introdução

Sistemas polarimétricos de radar multifrequência representam uma nova geração de sensores de microondas ainda em avaliação para aplicação sistemática em sensoriamento remoto. As características de multifrequência e polarimetria destes sensores tornam possível não só a aquisição de informação sobre a superfície dos objetos, mas também sobre as características estruturais, dielétricas e volumétricas dos mesmos. O potencial na aplicação destes dados, particularmente na banda L, tem aumentado o interesse pelo seu uso em problemas de discriminação de culturas e florestas, avaliação de desflorestamento e detecção de mudanças.

Neste trabalho pretende-se investigar o uso das imagens de radar polarimétricas, obtidas pela missão SIR-C em abril de 1994 (esta missão foi repetida em

outubro de 1994), na classificação de diferentes tipos de cobertura através da extração de atributos dessas imagens e utilizando-as em combinação com os dados polarimétricos originais.

## 2. Dado polarimétrico e definições

A informação polarimétrica pode ser obtida através da decomposição do sinal do radar em dois sinais ortogonais, um horizontal e outro vertical, que são recebidos e processados em canais separados independentemente. A informação de polarização completa para cada pixel da cena imageada é descrita pela matriz de espalhamento [S], definida por

$$[S] = \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{pmatrix} \quad (1)$$

onde os subscritos *h* e *v* correspondem aos componentes do campo elétrico de transmissão e recepção polarizados na horizontal e na vertical, respectivamente. Cada elemento da matriz de espalhamento é uma função da frequência e dos ângulos de espalhamento e iluminação.

O dado polarimétrico também pode ser expresso em termos da matriz de Stokes [M]. Esta representação consiste de combinações lineares dos produtos cruzados dos 4 elementos da matriz de espalhamento [1].

$$[M] = \begin{pmatrix} S_{hh}S_{hh}^* & S_{hv}S_{hv}^* & S_{hh}S_{hv}^* & S_{hv}S_{hh}^* \\ S_{vh}S_{vh}^* & S_{vv}S_{vv}^* & S_{vh}S_{vv}^* & S_{vv}S_{vh}^* \\ S_{hh}S_{vh}^* & S_{hv}S_{vv}^* & S_{hh}S_{vv}^* & S_{hv}S_{vh}^* \\ S_{vh}S_{hh}^* & S_{vv}S_{hv}^* & S_{vh}S_{hv}^* & S_{vv}S_{hh}^* \end{pmatrix} \quad (2)$$

### 3. Procedimentos para extração de atributos

Este trabalho usa como base a matriz de Stokes para definição dos atributos discriminantes, através da combinação dos seus elementos. Nesta seção serão introduzidos os seguintes procedimentos de extração de atributos: diferença de fase e coeficiente de correlação complexa. Outros procedimentos, tais como razões normalizadas entre canais, autocorrelação "log1" e coeficiente de variação, entre outros, serão objetos de estudo futuro.

#### 3.1 Diferença de fase

A diferença de fase entre canais com ondas co-polarizadas (hh - vv) é definida por

$$\phi_{hh-vv} = \tan^{-1} \left[ \frac{\Im \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle}{\Re \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle} \right] \quad (3)$$

onde  $\Im$  e  $\Re$  representam as partes real e imaginária, respectivamente. Diferenças de fase também podem ser calculadas entre canais com polarização cruzada.

#### 3.2 Coeficiente de correlação complexa

O coeficiente de correlação complexa entre os elementos co-polarizados da matriz de Stokes é definido por

$$\rho_{hhvv} = \frac{\langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle}{\sqrt{\langle S_{hh} S_{hh}^* \rangle \langle S_{vv} S_{vv}^* \rangle}} \quad (4)$$

de onde se obtém o módulo e a fase. Tal definição também pode ser estendida para canais com polarização cruzada.

### 4. Região de estudo e obtenção das imagens

A área de estudo (figura 1) compreende o Projeto de Irrigação de Bebedouro (PIB) localizado na região do Sub-médio São Francisco (9°07'S, 40°18'WGr), a aproximadamente 40 km à nordeste do município de Petrolina, estado de Pernambuco [2].

#### 4.1 Descrição da região

O PIB está dividido em 2 partes, denominadas PIB I e PIB II, com área total aproximada de 3500 ha e 2000 ha, respectivamente. O PIB I é formado por

pequenas propriedades de 5 a 12 ha, áreas maiores destinadas a pequenas empresas privadas, áreas de reserva de vegetação natural e pequenos núcleos habitacionais. O PIB II possui uma área destinada a empresas privadas e outra destinada ao Serviço de Produção de Sementes Básicas (SPSB) da EMBRAPA.

Foi analisada a região do PIB II, especificamente a região composta por 4 pivôs com classes de milho, soja, restolho e solo preparado, pertencente ao Serviço de Produção de Sementes Básicas da Embrapa, além da classe caatinga, (ver figura 1).

Esta região foi visitada por ocasião da coleta de imagens e os dados referentes ao plantio das diversas culturas foram anotados.

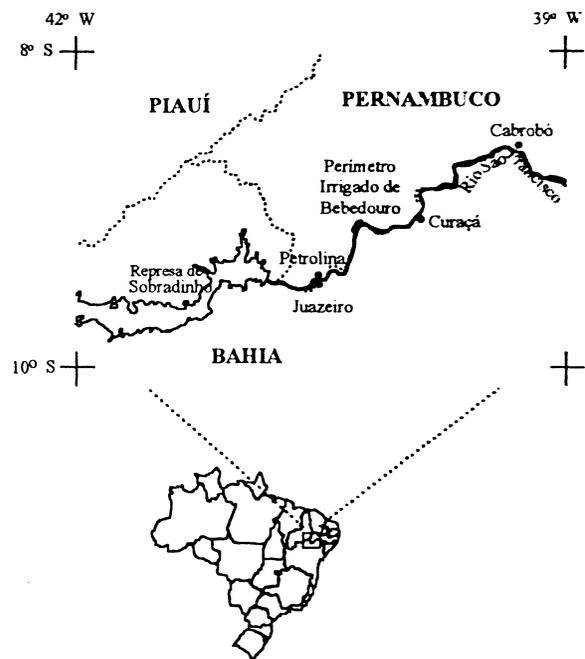


Figura 1 - Descrição da região estudada

#### 4.2 Parâmetros das imagens utilizadas

As imagens foram adquiridas através da missão space shuttle SIR-C/X-SAR em abril de 94. A tabela I mostra os principais parâmetros destas imagens.

Tabela I - Parâmetros da imagem

Frequência	L(1,254 Ghz) C(5,304 Ghz)
Polarização	HH, HV, VV, VH
Ângulo de incidência	37,97°
Altitude da plataforma	219,38 Km
Direção da órbita	descendente
Tipo do produto	Matriz de Stokes - 16 looks
Representação geométrica	Ground range
Espaçamento pixel	rgn 12,5m / az 12,5m

## 5. Metodologia

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho do uso da informação polarimétrica, com a utilização dos canais originais em combinação ou não com os canais transformados, na discriminação de culturas. Aqui foram usadas apenas imagens da banda L, em 3 polarizações (HH, HV, VV), totalizando 3 imagens originais na forma complexa. A figura 2 mostra uma imagem com polarização HH da região estudada e as classes de interesse. A tabela II apresenta os tipos de classes utilizadas e os respectivos número de amostras e número de pixels.

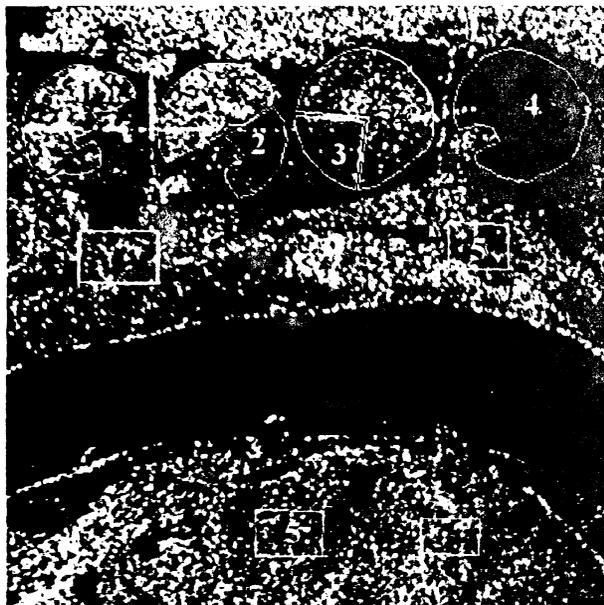


Figura 2 - Banda L, polarização HH, classes de interesse 1 - milho, 2 - soja, 3 - restolho, 4 - solo preparado, 5 - caatinga

Tabela II - Classes estudadas

Classes	Número de amostras	Número total de pixels
milho	2	6245
soja	2	6635
restolho	1	1498
solo preparado	1	5592
caatinga	4	5245

As combinações utilizadas para mensuração do poder discriminatório dos atributos, considerando-se as classes já definidas foram :

- 3 bandas originais em amplitude HH, HV e VV (aqui não existe a informação de fase dos atributos complexos).

- 2 bandas extraídas da correlação complexa, a saber : módulo e ângulo. A banda ângulo do coeficiente de correlação complexa é basicamente a informação diferença de fase da equação (3), filtrada quanto ao efeito do ruído “speckle” sobre a fase, por causa da operação média necessária para o cálculo da equação (4) em janelas 5x5 em torno de cada pixel da imagem. Aqui não existe a informação relativa a HV.
- o conjunto das 5 bandas acima.

Considera-se que os atributos em questão seguem uma distribuição gaussiana conjunta por causa do alto número de “looks” dos canais originais e adicionalmente do efeito de média no cálculo do módulo do coeficiente de correlação complexa. A fase para valores relativamente altos do coeficiente de correlação complexa também possuem distribuição semelhante à gaussiana [3].

A avaliação das contribuições dessas combinações de canais na discriminação das culturas é feita de duas formas :

1. comparando-se os resultados dos índices de desempenho médio (DM) e confusão média (CM), calculados sobre matrizes de classificação de áreas de treinamento e para as três combinações. Classificador utilizado : máxima verossimilhança pontual (seção 5.1).
2. através da comparação entre distâncias estatísticas entre distribuições (seção 5.2) avaliadas para as classes em estudo e para as três combinações de canais assinalados.

Esse método tem a vantagem de ser independente do algoritmo de classificação a ser utilizado.

### 5.1. Classificador pontual de máxima verossimilhança

O já bem conhecido classificador pontual de máxima verossimilhança [4], [5], é usado para classificar as áreas de treinamento das classes envolvidas.

Levanta-se uma matriz de classificação para cada combinação de canais. O desempenho médio (DM) é calculado pela média da percentagem de classificação correta para cada classe ponderada pelo número de pontos de cada classe. A abstenção média (AM) é calculada pela média das percentagens de pontos não classificados por classe ponderada pelo número de partes de cada classe. A confusão média (CM) é calculada como  $CM = 1 - (DM + AM)$ .

**5.2. Distância J-M**

A distância de Jeffries-Matusita entre duas distribuições é definida por

$$J_{ij} = \left\{ \int \left[ \sqrt{p(x|w_i)} - \sqrt{p(x|w_j)} \right]^2 dx \right\}^{1/2} \quad (5)$$

onde  $p(x|w_i)$  e  $p(x|w_j)$  são os valores da distribuição da i-ésima e j-ésima classe. No caso de distribuições gaussianas a equação (5) assume a forma

$$J_{ij} = \left[ 2 \left( 1 - e^{-\alpha} \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

onde

$$\alpha = \frac{1}{8} (\mu_i - \mu_j)^2 \left\{ \frac{\Sigma_i + \Sigma_j}{2} \right\}^{-1} (\mu_i - \mu_j) + \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{\left| \frac{\Sigma_i + \Sigma_j}{2} \right|}{\left[ \left| \Sigma_i \right| \left| \Sigma_j \right| \right]^{1/2}} \right\} \quad (7)$$

A distância JM pode ser usada para medir a separabilidade em conjuntos fixos de canais ou dado um conjunto de atributos, possibilita escolher um subconjunto deles, com certo número de canais, de tal forma que se maximize a distância JM média entre todos os pares de classes ou que se escolha o subconjunto de canais que maximize a menor distância JM entre pares de classes.

**6. Resultados**

**6.1. Classificação pontual**

As 3 bandas correspondentes às polarizações HH, HV e VV em amplitude chamaremos de canais originais. Na classificação usando estes dados obteve-se um desempenho médio (DM) de 61,4%, (ver Tabela III), e uma confusão média de 38,6%. A abstenção média (AM) nesta e nas tabelas seguintes foi nula porque o limiar de classificação foi ajustado para classificar todos os pontos. Considerando-se as classes individualmente nota-se que a classe de solo preparado teve um resultado bem acima da média, de 89,21%, enquanto a classe soja comportou-se de maneira oposta, tendo um resultado abaixo da média, de 34,05%, confundindo-se quase que na mesma proporção entre as classes de restolho e de caatinga. Este comportamento deve-se ao fato das médias destas classes estarem bem próximas como pode ser observado através da Tabela IV. As demais classes tiveram um resultado próximo ao desempenho médio.

Tabela III - Matriz de classificação  
Atributos : Amplitude HH, HV e VV

áreas \ classes	milho	soja	restolho	solo preparado	caatinga
milho	65,56 %	8,12 %	14,46 %	1,32 %	10,52 %
soja	6,86 %	14,05 %	29,14 %	9,60 %	20,32 %
restolho	5,80 %	8,41 %	65,02 %	19,75 %	1,00 %
solo preparado	1,00 %	0,59 %	9,17 %	89,21 %	0,01 %
caatinga	9,28 %	25,07 %	6,93 %	0,57 %	58,13 %

Desempenho médio (DM) : 61,4 %

Confusão média (CM) : 38,6 %

Tabela IV - Média e desvio padrão  
Atributos Amplitude - Banda L

		milho	soja	restolho	solo preparado	caatinga
HH	$\mu$	0,3453	0,2514	0,2104	0,1363	0,2864
	$\sigma$	0,1129	0,1012	0,0718	0,0539	0,0832
HV	$\mu$	0,1116	0,1022	0,0642	0,0336	0,1449
	$\sigma$	0,0328	0,0425	0,0212	0,0133	0,0440
VV	$\mu$	0,4074	0,2207	0,2078	0,1524	0,2598
	$\sigma$	0,1422	0,0809	0,0924	0,0606	0,0783

A Tabela V mostra o resultado da classificação quando são usados o módulo e o ângulo do coeficiente de correlação complexa. O desempenho médio melhora em relação a classificação anterior de 61,4% para 69,1%. As classes de milho e soja também tiveram uma melhora significativa, de 65,5% para 87% e de 34% para 45,8%, respectivamente. O fator preponderante na melhoria da separabilidade da classe milho é a informação de fase que registra o valor de  $\sim -\left(\frac{\pi}{2}\right)$  entre HH e VV (ver Tabela VI).

Tabela V - Matriz de classificação  
Atributos : Módulo e ângulo do coeficiente de correlação complexa

áreas \ classes	milho	soja	restolho	solo preparado	caatinga
milho	87,00 %	9,37 %	0,19 %	0,00 %	3,42 %
soja	2,76 %	45,89 %	6,61 %	0,22 %	34,50 %
restolho	0,06 %	0,00 %	60,08 %	29,17 %	10,68 %
solo preparado	0,00 %	0,00 %	12,41 %	87,41 %	0,17 %
caatinga	3,20 %	22,36 %	17,21 %	0,01 %	57,19 %

Desempenho médio (DM) : 69,1 %

Confusão média (CM) : 30,9 %

O módulo de correlação é também bem distinto nesse caso. No caso da soja, diminuiu a confusão com

a classe restolho, mas aumentou em relação à classe caatinga. Este resultado pode ser explicado pelas médias dessas classes em se tratando do atributo módulo do coeficiente de correlação complexa (ver Tabela VI), neste caso as médias da classe soja ( $\mu=0,2556$ ) e da classe restolho ( $\mu=0,6239$ ) diferenciaram-se bem, ao contrário do caso anterior. A classe restolho diminuiu o desempenho em 5% e aumentou a confusão com a classe solo preparado em 10%. A classe caatinga manteve o mesmo índice de desempenho, melhorou a confusão com a classe milho e piorou em relação a classe restolho. Apesar de alguns resultados isolados não serem satisfatórios, o uso da combinação do dado polarimétrico neste caso, melhorou a classificação de uma maneira geral, sem o uso do canal HV.

Tabela VI- Média e desvio padrão Atributos Módulo e ângulo do coeficiente de correlação complexa

		milho	soja	restolho	solo preparado	caatinga
Módulo	$\mu$	0,4590	0,2556	0,6239	0,7897	0,3126
	$\sigma$	0,1397	0,1313	0,1359	0,0823	0,1431
Ângulo	$\mu$	-1,6939	-0,4557	0,1430	0,1608	-,0074
	$\sigma$	0,5418	1,3094	0,2523	0,1351	0,8240

O uso conjunto das bandas usadas nas duas classificações mencionadas anteriormente, melhora o desempenho da classificação, para todas as classes, como pode ser visto na Tabela VII. A melhora é de 18,1% em relação à primeira classificação e de 10,4% em relação à segunda.

Tabela VII - Matriz de classificação Atributos :Amplitude HH, HV, VV + Módulo e ângulo do coeficiente de correlação complexa

áreas classes	milho	soja	restolho	solo preparado	caatinga
milho	87,15 %	10,09 %	0,46 %	0,00 %	2,27 %
soja	7,59 %	66,19 %	5,66 %	0,11 %	20,43 %
restolho	0,20 %	2,46 %	83,51 %	12,28 %	1,53 %
solo preparado	0,05 %	0,00 %	7,42 %	92,47 %	0,05 %
caatinga	2,32 %	22,45 %	4,38 %	0,00 %	70,82 %

Desempenho médio : 79,5 %  
Confusão média : 20,5 %

O desempenho individual da classe milho manteve o mesmo índice da segunda classificação, enquanto as classes de soja e restolho melhoraram em torno de 20% e as classes solo preparado e caatinga em 5% e 13% respectivamente. A confusão da classe

soja com a classe caatinga manteve o mesmo índice observado na primeira classificação.

6.2 Distâncias entre distribuições

No caso da comparação das distâncias entre distribuições foi analisado cada procedimento realizado nas classificações anteriores. A Tabela VIII mostra as distâncias JM mínima e média da análise de cada procedimento em separado. Os resultados desta análise confirmam os resultados obtidos anteriormente.

Tabela VIII - Distância JM mínima e média

	Amplitude IHH, HV, VV	Módulo e ângulo coef. cor. compl	Amplitude IHH,HV,VV Módulo e ângulo do coef.correl.compl
JM min	0,364460	0,568256	0,673633
JM med	0,895871	1,06852	1,31420

Como forma adicional de medir a importância dos diversos atributos aqui usados, usou-se a distância JM para escolher 3 canais entre 5 do conjunto completo. A Tabela IX apresenta todas as combinações possíveis de 3 canais considerando-se todas as classes definidas.

Tabela IX - Distância JM mínima e média das 5 bandas em combinações 3 a 3

		JM min	JM med
1	B1/B2/B3	0,60	1,12
2	B1/B2/B4	0,57	1,16
3	B1/B2/B5	0,57	1,13
4	B1/B3/B4	0,63	1,18
5	B1/B3/B5	0,59	1,20
6	B1/B4/B5	0,57	1,19
7	B2/B3/B4	0,33	0,74
8	B2/B3/B5	0,24	0,75
9	B2/B4/B5	0,17	0,79
10	B3/B4/B5	0,36	0,89
B1 - Ângulo do coeficiente de correlação complexa			
B2 - Módulo do coeficiente de correlação complexa			
B3 - Amplitude HH			
B4 - Amplitude HV			
B5 - Amplitude VV			

Os melhores desempenhos são das combinações do ângulo do coeficiente de correlação complexa com pares de amplitude HH e HV, HH e VV e HV e VV (selecões 4, 5 e 6). Foram realizadas classificações usando esses três conjuntos de atributos e os resultados são mostrados na Tabela X, assim como os resultados das classificações realizadas anteriormente.

Tabela X - Desempenho médio das classificações

Atributos	Desempenho médio
Amplitude HH, HV, VV	61,4 %
Módulo e ângulo do coeficiente de correlação complexa	69,1 %
Amplitude HH, HV, VV + Módulo e ângulo do coeficiente de correlação complexa	79,5 %
Ângulo do coeficiente de correlação complexa Amplitude HH, VV	67,6 %
Ângulo do coeficiente de correlação complexa Amplitude HH, HV	71,1 %
Ângulo do coeficiente de correlação complexa Amplitude HV, VV	73,7 %

## 7. Conclusões

A principal conclusão que se pode derivar destes resultados é que a informação de fase (entre HH e VV) é importante e não deve ser descartada em classificações utilizando-se dados polarimétricos complexos. Esta conclusão é reforçada ao se verificar que na tabela X todas as combinações com fase mostraram JM médias consistentemente maior que as sem fase.

O canal correlação também pode fornecer separabilidade para diversos casos, basta observar o que foi explicado na seção 6.1 com respeito às classes soja e restolho.

O presente trabalho vai continuar testando outros atributos e procurando estabelecer necessárias ligações com as propriedades estruturais das diversas classes de vegetação ou culturas.

## 8. Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Projeto Temático CNPq Geotec (Processo Institucional n. 680.061/940)

## Referências

- [1] J.J.van Zyl, H.A. Zebker, and C. Elachi, "Imaging Radar Polarization Signatures: Theory and Observations," *Radio Science*, vol. 22, pp. 529-543, 1987.
- [2] C.D. Rennó, "Avaliação de Medidas Texturais na Discriminação de Classes de Uso Utilizando Imagens SIR-C/X-SAR do Perímetro Irrigado de Bebedouro, Petrolina, PE." INPE, São José dos Campos, 1995.

(Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em Sensoriamento Remoto).

[3] J.S. Lee, K.W. Hoppel, S.A. Mango and A.R. Miller, "Intensity and Phase Statistics of Multilook Polarimetric and Interferometric SAR Imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 32 pp. 1017-1028, Sept. 1994.

[4] K. Fukunaga, "Introduction to Statistical Pattern Recognition", Academic Press, Inc, 1990.

[5] N.D.A. Mascarenhas e F.R.D.Velasco, "Processamento Digital de Imagens," IV EBAI 1989.